

Power generation performance of a photovoltaic module with triangular-pyramid-shaped concentrator

Masahiro KONO^{*1}Atsushi AKISAWA^{*2‡}

三角錐型太陽集光方式による太陽光発電モジュールの発電電力量評価

河野雅弘^{*1}秋澤 淳^{*2‡}

Abstract

The objective of this study is to evaluate the power generation performance of the photovoltaic modules with triangular pyramid shape concentrator. A unit of the pyramid modules have three photovoltaic cells. Therefore, the study examined various configuration of the circuit in terms of annual power generation with some different shapes of the pyramid module, and found that the circuit connecting three cells in parallel would be the best for every pyramid module. This study also investigated the power generation performance of some pyramid modules and compared with that of a conventional flat module in terms of power generation per cell area and that per installation area. It was confirmed that it would be possible to design pyramid modules to have better performance than the flat module in both of two indices. Comparing the improvement with that of light collection performance, the improvement in the power generation decreases by approximately 5 points in percentage. It is interesting to note that the annual or daily power generation behavior by pyramid module can be designed when the pyramid shape is selected accordingly.

Keywords: Solar concentration, Triangular pyramid, Mirror, Photovoltaic cell, Circuit simulation

キーワード: 太陽集光, 三角錐, ミラー, 太陽光発電セル, 回路シミュレーション

1. はじめに

固定買取制によって再生可能エネルギーによる発電が支援され、とりわけ太陽光発電は大幅に導入が進んでいる。一般的に太陽光発電パネルは斜めに傾斜した屋根に設置される他、傾斜した支持台に固定される。太陽は時々刻々位置が変化するためパネルに日射が斜めに入射するので、受光する日射量は正面から受光する場合よりも減少する。常に受光量を最大にするには追尾装置を用いて太陽を追尾する手法が取られる。特に集光型太陽光発電¹⁾の場合には太陽日射を500~1000倍に集光するため、2軸追尾装置²⁾を用いて太陽に正対するように制御される。太陽光発電パネルを固定、1軸追尾、2軸追尾の3通りの発電電力量を比較した研究³⁾もある。ただし、住宅等に太陽光発電パネルを設置する場合には、複雑な機構を持つ追尾装置は適さない。

非追尾型の集光方式も開発されている。松島ら⁴⁾は太陽

光発電パネルの前面に平面ミラーを組合せ、実験により短絡電流が最大で1.5倍程度に増加することを示した。集光系の形状として平面鏡2枚をV字型に設置する方式^{5,6)}や、放物面形状や双曲線形状のミラー集光系⁶⁾がある。Alnajideenら⁷⁾はV字型を拡張し、花びら状に4枚の平面ミラーを組合せたユニットを平面内に敷き詰める方式を提案し、実験によりある入射角度範囲で集光できることを報告している。V字型集光系を用いて通常のシリコン太陽光発電セルとCIGSセルの発電電力量比較を行なった研究⁸⁾もある。越後⁹⁾は放物面の楕型ミラーを用いた集光系を固定した場合について性能を評価し、3.3倍の受光量が得られることを示した。二つの放物面形状ミラーを組み合わせた複合放物面鏡¹⁰⁾ (Compound Parabolic Concentrator, 以下CPC) と呼ばれる集光系は、一定の許容入射角度を持たせることができる特徴がある。太陽が許容入射角度の範囲内にあれば追尾機構なしで日射を集められるので、昼間の太

*1 Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*2 Professor, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo
‡e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

Revised: February 28 2025, Accepted: June 2 2025

*1 元東京農工大学工学部機械システム工学科

*2 東京農工大学大学院工学研究院教授

(〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)

‡ e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

(原稿受付: 2025年2月28日, 受理日: 2025年6月2日)

陽の移動をある範囲で捕捉できる. Leutz ら¹¹⁾はフレネルレンズの場合に許容入射半角を持たせる設計手法を提案している.

Bernal-del Río ら¹²⁾は太陽光発電セルの表面に高さ 1mm 以下の微小な V 字型の溝を持つ透過型膜を貼り付けることにより, 発電出力の向上を実験的に確認した. 太陽光発電セルの表面に微細なピラミッド形状を成形することによって反射を抑える研究^{13,14)}が行われているが, 1 μ m 程度の形状である. それに対し, 田中ら¹⁵⁾はマクロな三角錐形状の側面に太陽光発電セルとミラーを配置し, それを組み合わせた集光系を提案した. 太陽が東西方向に移動しても, 固定されているが斜めに入射した日射をミラーでセルに反射させる機能を持つことを集光シミュレーションによって明らかにした. また, 従来の平板型パネルに比べ, セル面積あたりの日射量とモジュール設置面積あたりの日射量の両方の指標を同時に改善する設計パラメータがあることを示した. 三角錐形状の発電モジュールを水平に設置する方式であることから, 建物屋上や水平な屋根に設置することが容易である特徴を持つ.

ただし, 田中らの研究は光線追跡シミュレーションによる受光量の解析に留まっており, 太陽電池セルの発電電力量の評価にはなっていない. 1つのユニットには3枚のセルが組み合わせられるが, セルの回路的な接続方法について言及がない点に課題がある.

そこで, 本研究では三角錐型集光方式のセルに等価回路を当てはめ, 最も優位となる3枚のセルの接続方法を明らかにすることを目的とする. さらに, 発電電力量の観点から, セル面積あたり発電電力量と設置面積あたりの発電電

力量を従来の平板型モジュールと比較し, 提案方式の有効性を確認する.

2. 三角錐型太陽集光発電モジュール

2.1 モジュールの形状

対象とするモジュールの形状を Fig. 1 に示す (図の下方方向が南). モジュールは水平面に設置され, 中央の三角錐と辺を接して3つの三角錐が配置される. 中央の三角錐は南側斜面に PV セル, 北側の2つの斜面にミラーが設置される一方, 周辺の三角錐は北側にミラー, 南側の2つの斜面に PV セルが配置される. 中心の三角錐に隣接する三角形のセルまたはミラーから構成される六角形が基礎的なユニットとなり (Fig. 1(a)), このユニットが隙間なく平面を覆う. 3つのセルを持つ1ユニットの設置面積はこの六角形の底面積となる.

Fig. 1(b)は太陽の位置が東側にあり, 本モジュールに斜めに日射が入る状況を例示している. セル1とセル2には直接日射が当たるが, ミラー3に入射した光は反射してセル3に当たる. 太陽が西側にある場合はその逆となる. 田中らは本モジュールのセルとミラーが固定されているにもかかわらず, 太陽が移動しても各セルがある程度の日射を受けられ, 擬似的に追尾機能を持つことを明らかにした¹⁵⁾. 本研究でもその点に着目し, 発電電力量を評価する.

2.2 三角錐の設計パラメータ

いずれの三角錐も底面が同一の二等辺三角形である. 底面の三角形に対し, 対称性から三角錐の頂点は二等辺三角形の頂角の2等分線上にある. 三角錐の形状は次の3つの設計パラメータで決定される.

- θ_1, θ_1' : 底面の二等辺三角形の頂角
- θ_2, θ_2' : 斜面 (セル2またはミラー2) と底面がなす角
- θ_3, θ_3' : 頂点からの稜線と底面がなす角

中央と周辺の三角錐の形状は必ずしも同一とは限らないため, 周辺三角錐の角度に'をつけて区別する. 二等辺三角形の頂角は共通であり, 独立した設計変数は5つである. 設計方法の詳細は田中らの論文¹⁵⁾を参照されたい.

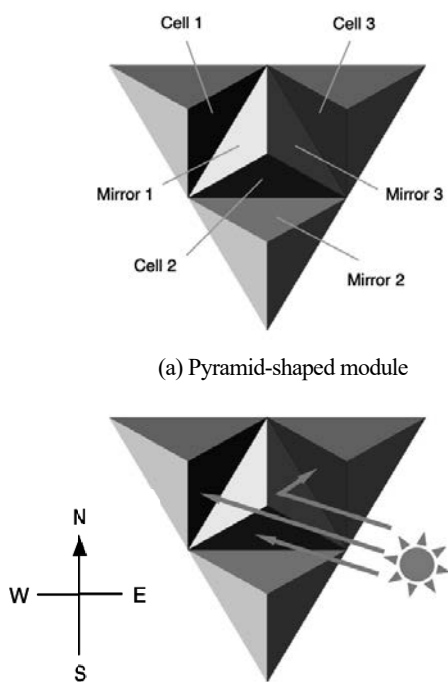
2.3 対象とする三角錐モジュール

(1) セルの回路接続方法の検討

本集光系は擬似的な追尾機能が特徴であることから, まず田中らの設計から追尾性能が異なる形状を選び出した. 追尾性能は, 次式の朝 (6:00~9:00) と夕方 (16:00~18:00) のセル面積あたり受光量 (受光密度) の増加率 δ を指標とした.

$$\delta = \frac{\text{対象時間帯の提案モジュールの受光密度}}{\text{対象時間帯の平板PVモジュールの受光密度}} - 1 \quad (1)$$

田中らによれば最大は $\delta=24.1\%$ をとる. そこで, $\delta=0, 10, 20, 24.1\%$ となる設計を取り出した. この4ケースについて, 後述する回路接続を当てはめ, 1ユニットの発電電力量を最大にするセルの接続方法を導く.



(b) Concentration image with incident from east side
Fig. 1 Sun tracking ability with fixed flat mirrors and PV cells

Table 1 Simulation conditions for solar concentration

Category	Item	Value
Material	Reflectance of mirrors	95%
	Absorptance of cells	100%
Settings	Location	Tokyo
	Direction	South
	Weather	Clear sky
Simulation	Period	January ~ December
	Time resolution	1 hour

(2) 発電電力量の向上効果の検証

田中らは受光量のみを評価した。本研究では受光量に基づいて発電電力量を検証する。田中らは性能指標としてセル面積あたり受光量とともに設置面積あたり受光量の2つを採用している。この2つの指標はパレート最適集合を形成し、指標の改善にはトレードオフがある¹⁵⁾。そこで、パレート集合の中から複数の設計を取り上げ、セル面積あたり発電電力量と設置面積あたり発電電力量を平板型モジュールと比較する。

2.4 受光量の評価方法

本集光系の受光量は光線追跡シミュレーション手法に基づき TracePro¹⁶⁾を用いて算出した。集光系の設置条件および解析条件を Table 1 に示す。毎月代表日 10 日, 20 日, 30 日 (2 月は 28 日) について, 1 時間毎の受光量を求めた。日射は常に快晴を仮定し, 直達日射のみを模擬し, 散乱日射は考慮していない。散乱日射も実際の発電に寄与するので, 今回の評価は安全側と解釈される。

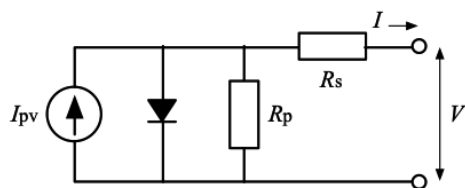


Fig. 2 Equivalent circuit of a photovoltaic cell

Table 2 Parameters of PV circuit

Category	Item	Value
Specification	Area	$24.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
	Current source (I_{pv})	8.88 A
Resistance	Series (R_s)	$3.5 \times 10^{-3} \Omega$
	Parallel (R_p)	100 Ω
Diode parameters	Saturation current (I_s)	$1.0 \times 10^{-8} \text{ A}$
	Diode factor (a)	1.17

3. 太陽光発電の回路シミュレーション

3.1 太陽電池セルの等価回路

各セルに入射した日射による太陽電池セルの出力を計算するため, 回路シミュレーションツールである LTspice¹⁷⁾を使用した。LTspice は単独の太陽電池セルの特性¹⁸⁾や複数が接続された太陽電池モジュールの解析¹⁹⁾に用いられている。1つのセルの等価回路を Fig. 2 に, 等価回路の IV 特性を式 (2) に示す²⁰⁻²²⁾。ここでは太陽電池をシリコン型とし, 用いた回路のパラメータを Table 2 に示す。

$$I = I_{pv} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{aKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2)$$

ただし, 記号は次を意味する。

a : ダイオード因子

I : 出力電流

I_{pv} : 電流源の電流

I_s : ダイオード飽和電流

K : ボルツマン定数

q : 電子の電荷

R_p : 並列抵抗

R_s : 直列抵抗

T : セル温度

V : 出力電圧

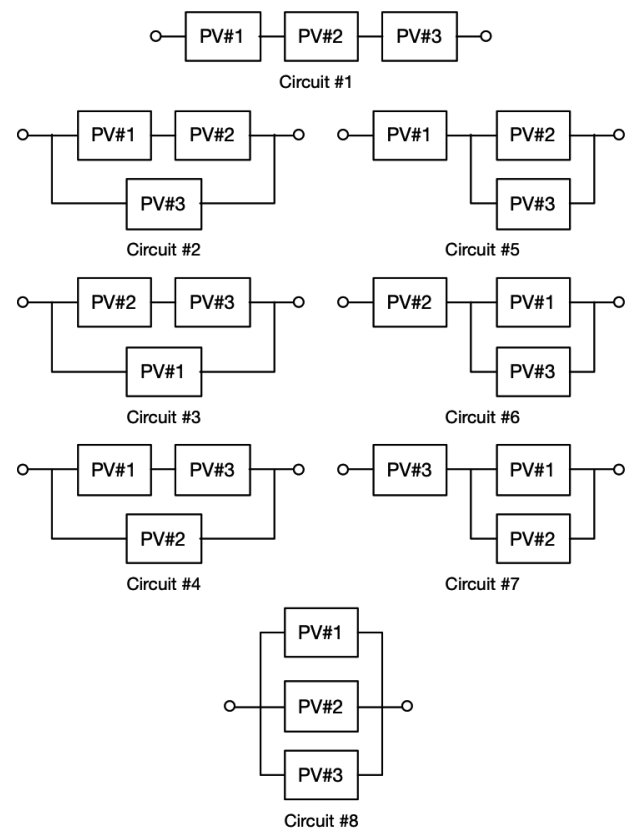


Fig. 3 Configurations of the circuit connecting 3 PV cells

Table 3 Specification of pyramid modules

Item		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Flat
Angle (°)	θ_1, θ'_1	130	120	110	110	—
	θ_2	20	70	40	60	—
	θ_3	50	20	10	10	—
	θ'_2	10	30	40	40	—
	θ'_3	60	60	40	60	—
δ (%)		0.0	10.0	20.0	24.1	0.0
Area (m ²)	Cell #1	3.7×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻³	1.7×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	—
	Cell #2	3.1×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	1.1×10 ⁻³	8.7×10 ⁻⁴	—
	Cell #3	3.7×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻³	1.7×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	—
	Total	3.9×10 ⁻³	3.9×10 ⁻³	4.4×10 ⁻³	4.5×10 ⁻³	0.54
Installation area (m ²)		7.7×10 ⁻³	8.7×10 ⁻³	9.4×10 ⁻³	9.4×10 ⁻³	1.0
Cell area/ installation area (-)		0.50	0.45	0.47	0.47	0.54

ここで、セルの面積は三角錐形状に依存する。電流源の電流およびダイオード飽和電流は入射する日射に起因することから、セル面積に比例して変化させた。一方、等価回路の直列抵抗・並列抵抗はそれぞれ並列に配置されるので、セル面積に反比例させて算出した。

3.2 3つのセルの接続方法

3つのセルを直列・並列に接続する方法はFig.3に示すように8通りある。本研究では8通りすべてを評価した。各回路について各時点の受光量に基づいて最大出力点を算出した。

3.3 比較対象の平板型モジュール

提案モジュールと比較するため、真南向きで地表と30度の傾斜角で設置された平板型太陽光発電モジュールを想定する。平板型モジュールは提案モジュールと同じセル面積を持つものとする。一般的に平板型モジュールは南北方向の隣同士で影になることを防ぐため距離を離して設置する。東西方向に一列に配置されたパネルが隙間を空けて平行に複数配置される状況を想定する。モジュール間の隙間は、田中らの先行研究と同様にモジュール高さの2倍と仮定した²³⁾。設置角を θ としてモジュールの設置面積 L とセル面積 S の関係は次式で表される。設置角が30度の時、設置面積に対するセル面積の比率は0.536となる。

$$L = S(\cos \theta + 2 \sin \theta) \quad (3)$$

平板型モジュールは一つのセルとしてモデル化し、同じパラメータに基づいてLTSpiceにより出力を算出した。

4. 発電シミュレーション結果

4.1 三角錐形状のパラメータ設定

朝夕の集光増加率 δ が異なる4ケースの三角錐の設計角

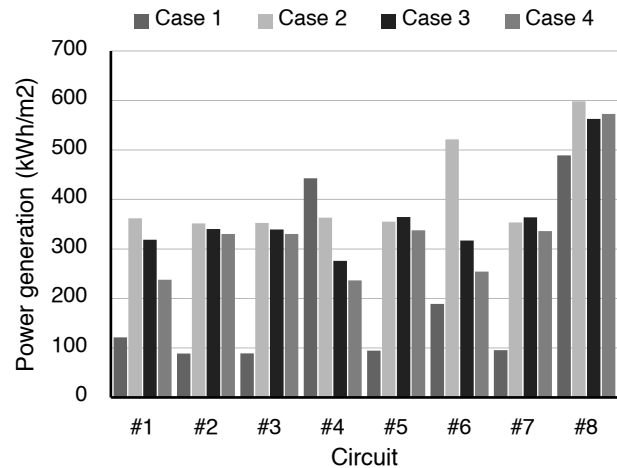
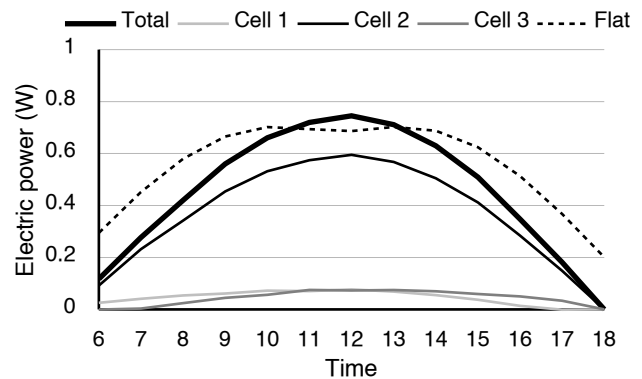
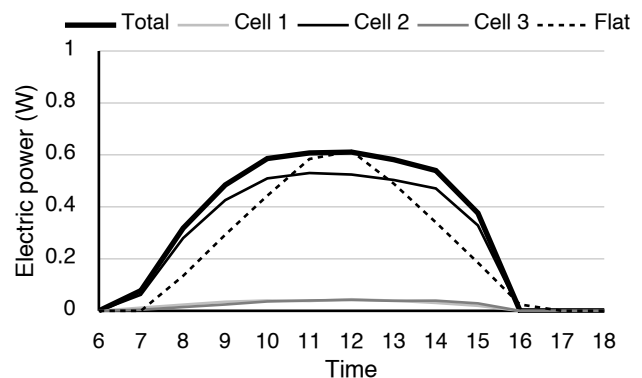


Fig. 4 Annual power generation per cell area by circuits



(a) 20 June



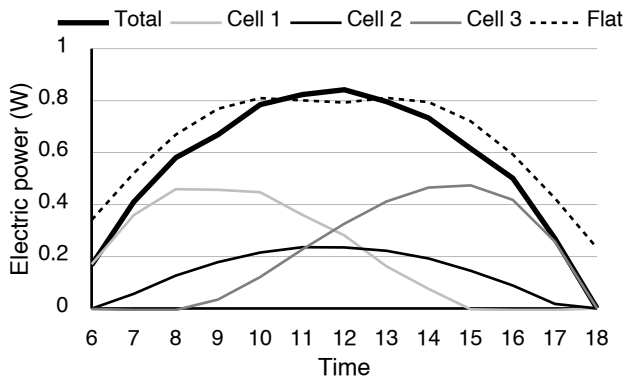
(b) 20 December

Fig. 5 Power generation behavior of Case 1 (Circuit #8)

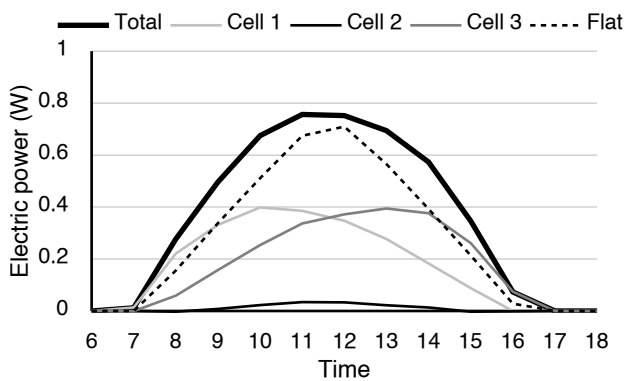
度、セル面積および設置面積をTable3に示す。設置面積に対するセル面積は0.45~0.5程度であり、平板型モジュールに比べてやや小さい。

4.2 セルの接続方法別の比較

Fig.3に示した回路の接続方法別に、セル面積あたり年間発電電力量について4つのケースに関する比較をFig.4に示す。どのケースにおいても回路8(3つのセルが並列接続)が最も発電電力量が多い。回路8以外ではセルの一



(a) 20 June



(b) 20 December

Fig. 6 Power generation behavior of Case 4 (Circuit #8)

つないし二つが直列接続されており、当該セルの出力電流が小さい場合にセル全体の出力が抑えられることに起因する。

Case 2~4 では回路 8 以外の発電電力量は $25\sim 35\text{ kWh/m}^2$ 程度と大きな差がない一方、Case 1 では回路 4 と回路 8 以外の発電電力量は 10 kWh/m^2 と大きく減少している。これはセル 2 に対してセル 1 およびセル 3 の面積が一桁小さく、出力が小さいことによると考えられる。このことから、3 つのセル面積に大きな差がない設計が高い性能につながる事が示唆される。

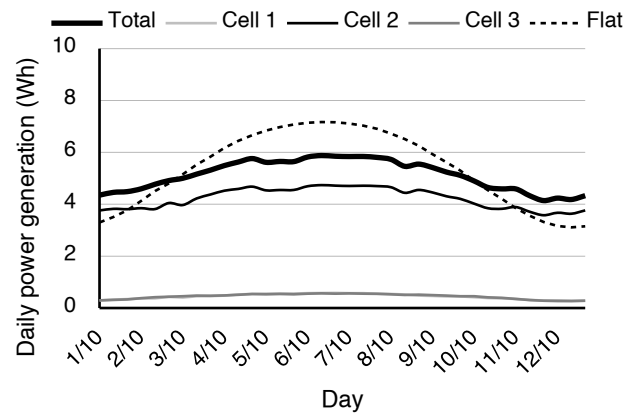
この結果より、三角錐型モジュールにおいては 3 つのセルを並列に接続する方式が適当であることが導かれた。これを踏まえ、以後では回路 8 のみを対象とした。

4.3 発電出力の時間変化

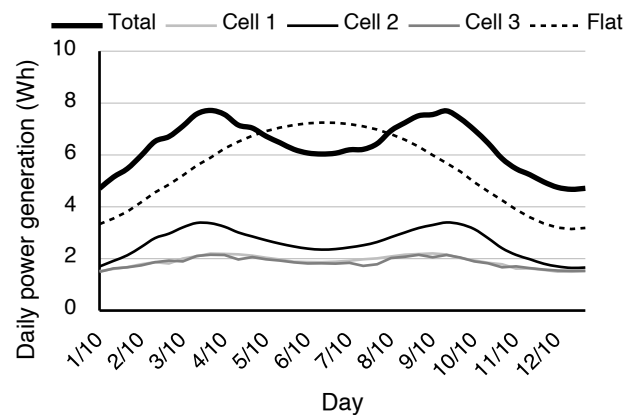
一日の発電挙動に朝夕の集光増加率 δ が与える影響をみるため、6 月 20 日（夏至相当）と 12 月 20 日（冬至相当）について Case 1 と Case 4 の発電出力時間変化を Fig. 5~6 に示す。回路の接続方法はいずれも回路 8 の結果である。

Case 1 でも Case 4 でも、6 月 20 日の発電出力は 12 時前後を除いて平板型の PV の方が多い一方、12 月 20 日は一日を通して三角錐型モジュールの方が発電出力が多い。三角錐型モジュールは冬季の発電に優位性がある。

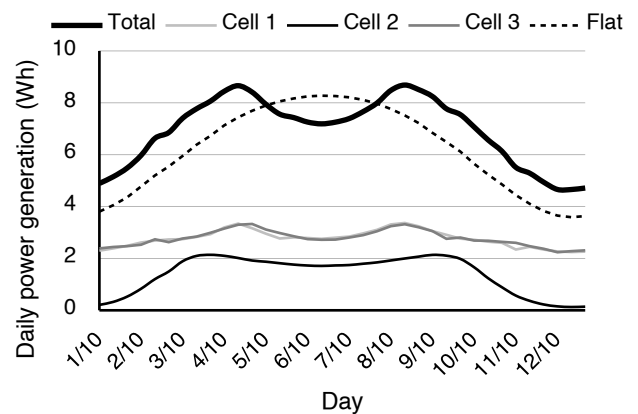
δ がゼロの Case 1 では中央のセル 2 による発電が夏季も冬季も支配的であり、セル 1 とセル 3 の発電出力は少な



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 4

Fig. 7 Power generation through one year (Circuit #8)

い。それに対し δ が最大の Case 4 では、セル 2 の面積が小さくなることから発電出力が縮小する一方、セル 1 とセル 3 の寄与が大きくなる。午前と午後でそれぞれの発電の分担が切り替わる様子が見て取れる。その結果、6 月 20 日では平板型 PV との朝夕の差が減少している。

4.4 発電電力量の年間変化

ここでは回路 8 について、Case 1, Case 2 および Case 4 の 1 年間の発電挙動を比較する (Fig. 7)。Case 1 では年間を通じてセル 2 が大部分を発電しており、年間の変動は小さい。セル 2 の面積が支配的なため、単一の平板型 PV の年

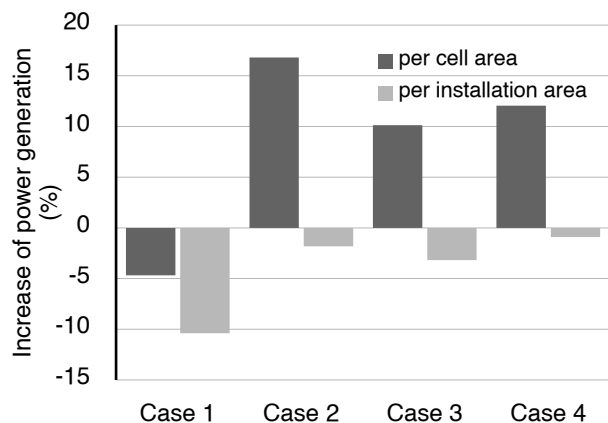


Fig. 8 Increase rate of annual power generation compared with a flat module

間変動と同様に6月あたりにピークを持つと考えられる。それに対し、Case 2およびCase 4では春秋の中間季に発電電力量のピークを持つ点に大きな違いが見られる。Case 2もCase 4もセル1とセル3の発電電力量は年間ではほぼ一定である。セル2の発電電力量が中間季にピークを持つが、Case 4では11月から2月にかけて発電電力量が小さい。Case 2では3つのセルの面積がほぼ同程度であり、本提案の三角錐型モジュールの設計においてはセル面積のバランスに留意する必要があることが示唆される。

Fig. 7の結果より、朝夕の集光増加率 δ は1日の発電挙動だけでなく、年間の発電変動に大きく効いている。中間季に発電電力量のピークがあることは、平板型モジュールであれば傾斜角を標準よりも大きく設定した場合に相当する。言い換えれば、三角錐型モジュールは水平に設置するが、平板型モジュールを傾斜させた状況を等価的に実現していると解釈できる。

セル面積あたりと設置面積あたりの年間発電電力量を平板型モジュールと比較した結果をFig. 8に示す。Case 1は平板型モジュールよりも性能が5%程度劣る。Case 2の性能が約17%高く、Case 3とCase 4は約10%向上する。Case 2はセルの合計面積が相対的に小さくミラーによる集光が効果的である。Fig. 7(b)に示されるように、冬季にもセル2が発電できていることからCase 2はセル面積あたり年間発電電力量が4ケースの中で最大になったと考えられる。設置面積あたり発電電力量でみると、今回対象としたどのケースも平板型モジュールよりも低い。Case 1は10%程度下回るが、Case 2、Case 4では平板型モジュールとほぼ同程度である。

5. 発電電力量の向上効果の検証

5.1 三角錐形状の設定

ここではセル面積あたり受光量と設置面積あたり受光量のどちらも改善される4つの三角錐型モジュールを評価対象とする。発電電力量の観点からみても三角錐型モジュール

Table 4 Specification of pyramid modules

Item		Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Angle ($^{\circ}$)	θ_1, θ'_1	150	170	160	150
	θ_2	40	50	40	40
	θ_3	60	50	40	20
	θ'_2	40	40	40	40
	θ'_3	40	50	50	60
Light collection improvement (%)	Cell area	4.3	10.5	14.7	19.5
	Installation area	50.1	46.6	39.3	18.8
Area (m^2)	Cell #1	8.3×10^{-4}	2.8×10^{-4}	5.6×10^{-4}	8.4×10^{-4}
	Cell #2	2.2×10^{-3}	6.8×10^{-4}	1.1×10^{-3}	9.9×10^{-4}
	Cell #3	8.3×10^{-4}	2.8×10^{-4}	5.6×10^{-4}	8.4×10^{-4}
	Total	3.9×10^{-3}	1.2×10^{-3}	2.2×10^{-3}	2.7×10^{-3}
Installation area (m^2)		5.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}	3.4×10^{-3}	5.0×10^{-3}
Cell area/ installation area (-)		0.77	0.71	0.65	0.53

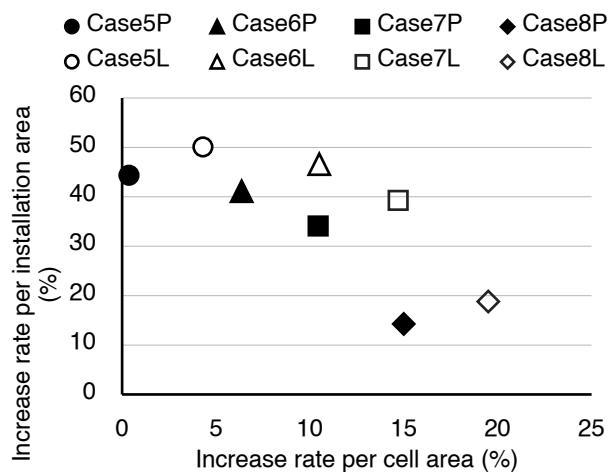


Fig. 9 Improvement in terms of power generation and sunlight collection

ルが有効であることを検証する。田中らはこれら二つの指標がどちらも最大限に改善されるパレート最適集合を見出した¹⁵⁾。その中からセル面積あたり受光量が平板型に比べて概ね5~20%改善される4つのケースを選び出した。それぞれの設計パラメータ等をTable 4に示した。Case 5は設置面積あたりの改善度を、Case 8はセル面積あたりの改善度を重視した設計である。

5.2 発電電力量の評価結果

前述の回路接続の解析結果を踏まえ、セルの接続方法はいずれもすべて並列接続(回路8)とした。比較対象は南向きに30°傾斜した平板型モジュールとした。

発電電力量のシミュレーション結果を受光量の評価と合わせて Fig. 9 に示す。プロットの黒塗りが発電電力量、白抜きが受光量の結果を示す。これより、セル面積あたりでは発電電力量は受光量よりも 4~4.5% 低下している。一方設置面積あたりでは 4.5~6% 程度低下している。Case 5 ではセル面積あたり改善効果の低下により、平板型モジュールと同程度になる。全体的に三角錐型モジュールでは受光量の改善効果に比べて 5% 程度の低下が見込まれるが、セル面積あたりおよび設置面積あたりの両方の指標を改善する設計が可能であることが示された。

5.3 許容入射半角の評価

本論文の三角錐型モジュールは様々な設計パラメータを与えて形状、発電電力量を求めている。幾何学的集光比はセル面積に対する設置面積の比となる。Table 4 のケースでは幾何学的集光比は 1.3~1.9 である。

複合放物面型ミラーの場合には開口部に入射する光を受光部に導く入射角度の範囲（許容入射半角）が予め与えられる。三角錐型モジュールでは許容入射半角に相当するものがないので、結果としてどの位置の太陽からの日射が有効に捉えられたかを分析する。太陽の位置を方位角（東が 90°, 南が 180°）と仰角（天頂が 90°）で表し、年間の集光シミュレーションにおいて得られた最大の受光量で規格化した受光量の比の分布を求めた。Fig. 10 に Case 7 の結果を示す。比が 0.8 程度になるあたりを許容入射範囲とみなすと、東西方向は 140°~220° 程度、仰角は 50°~90° 程度が集光されている。三角錐型モジュールが水平面に設置されることを踏まえ等価的な許容入射半角に換算すると、東西方向は 40°, 仰角方向は 40° と推定される。ただし、許容入射半角は三角錐形状に依存するため、一般的な特徴を議論することは今後の課題である。

6. おわりに

本研究ではセルおよび平板ミラーで構成される三角錐型モジュールの発電電力量を評価し、先行研究による受光量の評価を発電電力量の観点から検証した。その結果、次の知見を得た。

- 三角錐型モジュールの 3 つの太陽電池セルを並列接続する場合に年間発電電力量が最大になる。
- 三角錐形状の設定次第で、平板型の発電パターンと異なり、中間季にセル面積あたり発電電力量がピークをとるモジュール設計が可能である。
- 受光量に比べて発電電力量では、セル面積あたり改善効果も設置面積あたり改善効果も 5% 程度低下するが、どちらの指標も改善するような三角錐型モジュールを設計可能である。

先行研究ではミラーによる集光効果の評価に留まっていたが、本研究により発電電力量の観点から集光による効果を検証することができた。三角錐型モジュールは平面上に敷き詰めて使用されるが、三角錐の設計次第で異なる特性

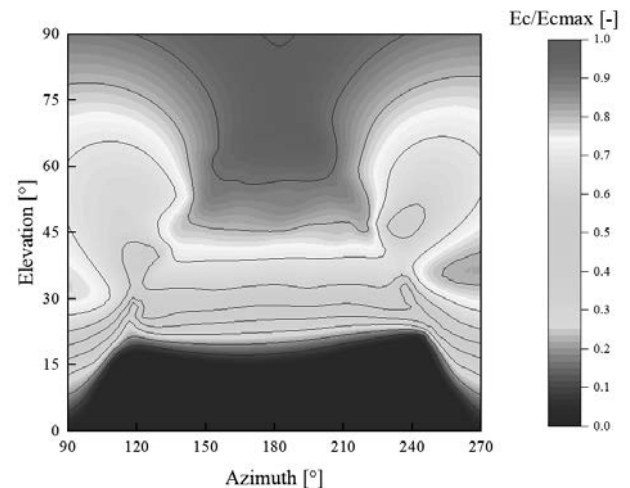


Fig. 10 Effect of sun position on power generation by pyramid module (Case 7)

を付与できることが示された。

提案モジュールは平面上に設置される。三角錐形状が相似的に小さくても集光機能は同じであり、シート状に成形が可能と予想される。したがって屋根材などの建材一体型モジュールに向いていると考えられる。傾斜している屋根が一般的であることを考慮すると、傾斜面を想定した三角錐形状の設計が今後の課題と考えられる。

謝辞

太陽電池のパラメータについて産業技術総合研究所加藤和彦博士に助言をいただいたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) Jun Hashimoto, Xue Yanqun, Kenji Otani, Performance and Characterization Results from Concentrator Photovoltaic Demonstration Field-test, Journal of the Japan Institute of Energy, **94**, 1387-1392 (2015).
- 2) Sebastijan Seme, Gregor Sprcic, Domen Kavsek, Stane Bozicnik, Tomislav Letnik, Zdravko Praunseis, Bojan Stumberger, Miralem Hadziselimovic, Dual-axis photovoltaic tracking system - Design and experimental investigation, Energy, **139**, 1267-1274 (2017).
- 3) Omar Rafae Alomar, Omar Mohammed Ali, Bashar Mahmood Ali, Veen S. Qader, Obed M. Ali, Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems: An experimental and theoretical study, Case Studies in Thermal Engineering, **51**, 103635 (2023).
- 4) Toshio Matsushima, Shinya Takagi, Concentrating solar module with horizontal reflectors, Proceedings of the 15th Symposium on Environmental Engineering, **408**, 355-358 (2005).
- 5) Runsheng Tang, Xinyue Liu, Optical performance and design optimization of V-trough concentrators for photovoltaic applications,

- Solar Energy, **83**, 2154-2166 (2011).
- 6) Abid Ustaoglu, Volkan Akgül, Junnosuke Okajima, Performance investigation of truncated low concentrating photovoltaic-thermal systems with V-trough, compound hyperbolic and compound parabolic concentrators, Applied Thermal Engineering, **232**, 121028 (2023).
- 7) Mohammad Alnajideen, Min Gao, A new configuration of V-trough concentrator for achieving improved concentration ratio of >3.0x, Solar Energy Materials & Solar Cells, **245**, 111877 (2022).
- 8) Miguel Barragán Sánchez-Lanuz, Isidoro Lillo-Bravo, Sara Moreno-Tejera, J.L. Sancho Rodríguez, Jose-Maria Delgado-Sanchez, Experimental CIGS technology performance under low concentration photovoltaic conditions, Journal of Cleaner Production, **446**, 141384 (2024).
- 9) Keisuke Echigo, Analysis of the optical characteristics of parabolic trough collectors for solar power generation system, Journal of JSES, **42**(3), 63-72 (2016).
- 10) Roland Winston, Juan C. Miñano, Pablo Benítez, Nonimaging Optics, 467-470 (2005), Elsevier Academic Press, London.
- 11) Ralf Leutz, Akio Suzuki, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi, Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators, Solar energy, **65**, 379-387 (1999).
- 12) Santiago Bernal-del Río, Gilberto Osorio-Gómez, Influence of an Anti-Reflective Coating (ARC) with a pyramidal texture on a Building Integrated low-Concentration Photovoltaic (BICPV) system, Energy for Sustainable Development, **71**, 222-237 (2022).
- 13) K.P. Sreejith, Tanushree J.B. Nath, Anil Kottantharayil, Comprehensive cell to module optical loss analysis of metal assisted chemically etched inverted pyramid textured multi-crystalline silicon solar cells and modules by ray-tracing method, Solar Energy, **244**, 315-321 (2022).
- 14) Anxin Li, Shuai Zou, Chen-Wei Peng, Mengfei Ni, Longfei Dai, Wangyin Han, Zheng Lua, Zhenzhen Chen, Xiaodong Su, Improving the light trapping ability and flexural strength of ultrathin monocrystalline silicon wafers with submicron pyramid textures, Solar Energy Materials & Solar Cells, **271**, 112847 (2024).
- 15) Yugo Tanaka, Atsushi Akisawa, Masayuki Nakayama, Non-tracking solar concentration performance of triangular pyramid shape with mirrors, J. Japan Solar Energy Society, **46**(3), 71-76 (2020)
- 16) Lambda Research Corporation, Solar Collector Design, and Analysis using TracePro, <https://lambdaresearch.com/solar-collector> (accessed Feb. 2025)
- 17) LTSPICE, <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators.html#LTspice> (accessed Feb. 2025)
- 18) Md. Nazmul Islam Sarkar, Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis, Renewables, **3**(13) (2016).
- 19) Nobuo Sato, Ken'ichi Mizuno, A study on output fluctuation characteristics due to shading of photovoltaic panel, Report of Ciba Institute of Technology, **63**, 9-13 (2016).
- 20) Vincenzo Stomelli, Mirco Muttillio, Tullio de Rubeis, Iole Nardi, A New Simplified Five-Parameter Estimation Method for Single-Diode Model of Photovoltaic Panels, Energies, **12**(22), 4271 (2019).
- 21) Simon Lineykin, Moshe Averbukh, Alon Kuperman, An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **30**, 282-289 (2014).
- 22) A. Rezaee Jordehi, Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **61**, 354-371 (2016).
- 23) 建築物環境計画書作成マニュアル3. 再生可能エネルギー利用設備導入検討編, 大阪市都市計画局建築指導部, 19 (2015).